

수질변수의 지화학적 거동을 조절하는 요인에 대한 고찰 - 서해 경기만을 중심으로

김기현* · 김나영 · 박 경

*세종대학교 지구과학과, 인하대학교 해양학과

Factors Controlling Geochemical behavior of Water Quality Parameters - Case study of Kyunggi Bay, Yellow Sea

Ki-Hyun Kim*, Na Young Kim and Kyeong Park

**Department of Earth Science, Sejong University,
Seoul 143-747, South Korea*

*Department of Oceanography, Inha University,
Inchon 402-751, South Korea*

To analyze factors controlling geochemical behavior of water quality parameters at the Kyunggi Bay area, we conducted a series of statistical analysis on the water quality data collected from 61 articles/reports and the meteorological data (1985~1998). A series of statistical approaches were conducted on the data groups divided on the basis of salinity and water depth. The results indicated that the strongest correlation was seen between mid-high salinity ranges at surface water. The correlation analysis between surface and bottom waters for same salinity group showed that most parameters were significantly correlated at the cost of different water depth. The relationships between water-quality and meteorological parameters were also analyzed using the meteorological data measured from four monitoring stations in Kyunggi Bay. The six data groups divided on the basis of both salinity and water depth generally exhibited abundant correlations among most important parameters. Factor analysis (FA) was also conducted to describe major components affecting the water-quality parameters in the study area. The results of FA indicated that the water-quality of the Kyunggi Bay is affected most significantly by such factors as: meteorological (air temperature, steam pressure), chemical (TIN, NH₄-N, PO₄-P) and biological (chlorophyll-a, sunshine time, sunshine percent) factors. The overall results of our study hence suggest the possible significance on the interactions between water-quality and meteorological parameters.

Key words: correlation analysis, factor analysis, water quality parameter, meteorological data, Kyunggi Bay

1. 서 론

지구의 환경생태계 내에 존재하는 모든 생명체는 서식지의 기후에 적응하며 살아간다. 기후변화는 대기과 해양이라는 거대한 열 교환장치가 정상상태(steady-state condition)로부터 이탈함으로써 야기된다고 볼 수 있다. 그런데 해양과 대기간의 변화는 해양과 대기를 구성하는 공기와 물(해수)간에 물리적 변화가 작용하

는 것으로부터 출발한다고 볼 수도 있다. 해양의 기본 구조는 대기-해양 상호작용에 의해서도 결정되지만, 역으로 대기구조의 변화가 해양의 역할에 영향을 미치는 것으로 간주할 수도 있다. 이러한 이유로 인해 해양구조의 변화는 해양-대기의 상호작용에 민감하게 반응하는 것으로 나타난다. 이는 변화의 동인으로 작용하는 대기구조와의 상대적인 관계로부터 설명이 가능하다.

해상에서 대기구조의 변화에 대한 해양반응, 해양구조에 의한 기단의 변질, 해양-대기 경계층에서의 열수지와 관련된 문제, 물리-생물-화학의 교호작용 등에 대

*Corresponding author

한 해석은 두 학문분야의 공동조사와 연구를 통해 광범위한 이해의 공감대를 형성할 수 있는 분야로 볼 수 있다. 국내의 경우 기존에 소양호,¹⁾ 광양만,²⁾ 진해만³⁾ 수계 등에서 생물학적인 관점에 기초하여 수질관측 및 미생물에 대해서 시·공간적으로 제한적인 요인분석을 실시한 바 있다. 외국의 경우에는 Carter *et al.*⁴⁾이 Washington, D.C.의 Potomac River에서 기상(풍속, 일조율) 및 수질(수온, 투명도, 총부유물질)변수의 관계를 분석하여, 이들 요인이 수생식물의 성장에 미치는 영향을 연구한 바 있다. 경기만에서는 Choi and Shim⁵⁾이 광도, 보상깊이, 소광계수, 투명도, 부유물질 등의 분포특성을 연구한 바 있다. 유와 신⁶⁾은 태안반도에서 수온, 염분, 소광계수, 엽록소 등을 이용하여 식물플랑크톤에 대한 광 조건을 연구 수행한 바 있다. 그러나 이러한 기존의 연구들은 일부 수질변수 및 제한된 기상요소와의 관계를 분석하는데 국한된 것으로서, 아직까지 본 연구 해역에 대해서 수질변수와 기상요소의 상호관계 등에 대한 자료의 축적이 미흡하다. 최근 조와 채⁷⁾는 이질적인 연구집단에 의해 발표된 기존 수질 관측자료를 이용하여 장기간의 수질변동 추이를 영역분할 분석법으로 추정·분석한 결과, 진해·마산

만 해역의 수질이 지속적으로 악화되고 있음을 발표하였다. 또한 제어가 어려운 자연적 영향을 감안하여, 수질오염의 진행상황을 파악하여야 적절한 수질관리 대책을 수립할 수 있다고 주장하였다.

이미 본 연구진은 경기만 지역을 중심으로 1985년부터 1998년의 14년 동안 수행된 61개 연구사업 및 보고서를 토대로 수질자료를 수집하여, 주요 수질변수들의 기초적인 분포특성에 대한 분석을 시도한 바 있다.⁸⁾ 각종 이질적인 연구집단에 의해 발표된 수질변수들의 거동을 체계적으로 해석하기 위해 각 수질변수들을 염분의 차이(저, 중, 고염분) 및 수심의 차이(표, 저)를 기준으로 총 6개의 그룹으로 분류하였다. 따라서 광범위한 지역의 수질변수를 유형적으로 분류하고, 유형별 분포특성을 정의하는데 유용하였다. 이러한 연구사업의 후속과제로, 본 연구에서는 각각의 수질변수와 이들의 거동을 조절하는 지화학적 인자와의 연계 등을 설명하기 위해 다양한 통계적인 분석을 실행하였다.

본 연구에서는 경기만 해역(Fig. 1)의 주요 수질변수들에 대해 지화학적 요인들이 어떠한 방식으로 연계되는가를 밝히는데 주력하였다. 이런 목적을 위해, 1차적으로 물리·화학적인 방식으로 분류된 그룹별 수질자료

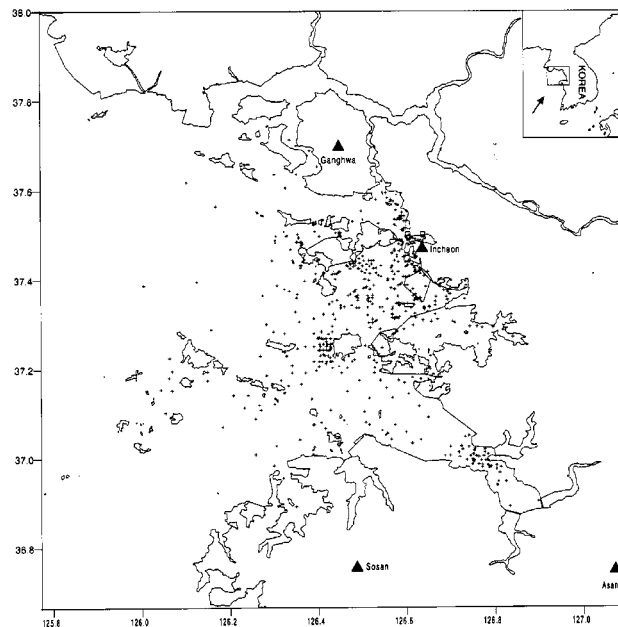


Fig. 1. A map of measurement locations for the water-quality (+) and meteorological data (▲) used in the study (Kyunggi Bay, KOREA, 1985-1998).

를 이용하여 개별 변수간에 존재하는 상관성의 유무와 강도를 분석하였다. 2차적으로는 경기만 지역의 수질 변수와 그에 상응하는 기상자료와의 상관성을 분석하였다. 그리고 이에 덧붙여 기상인자가 수질변수들의 거동에 미치는 영향을 분석하였다. 마지막으로 수질변수의 분포를 결정짓는 대기 및 해양의 주 요인의 종류와 특성을 규명하기 위해, 요인분석(factor analysis)을 실시하였다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 체계적인 접근방식을 통해, 경기만 지역에 대한 해수질 변화의 기본적인 경향을 분석할 수 있는 토대를 지화학적 관점에서 해석하고자 하였다.

2. 자료 및 방법

2.1. 자료 수집

본 연구에서 수질자료는 경기만의 위도 36°53'30"~37°42'45"N, 경도 126°00'22"~126°53'50"E 범위 이내에서 1985년부터 1998년 사이에 수행된 61개 연구사업 및 보고서⁸⁾로부터 취하였다. 기상자료는 기상청 기상월보⁹⁾를 토대로 강화, 서산, 아산, 인천지점의 자료를 사용하였다.

본 연구에서 수집된 수질자료는 수온(seawater temperature, °C), 염분(salinity, psu), 총부유물질(total suspended solid; TSS, mg/l), 용존산소(dissolved oxygen; DO, mg/l), 화학적 산소요구량 (chemical oxygen demand; COD, mg/l), 총무기질소 (total inorganic nutrient; TIN, mg/l), 질산염+아질산염 질소(nitrate+nitrite nitrogen; NO₃-N+NO₂-N, mg/l), 암모니아 질소(ammonia nitrogen; NH₄-N, mg/l), 인산염 인(phosphate; PO₄-P, mg/l), 규산염 규소(silicate; Si(OH)₄-Si, mg/l), 엽록소(chlorophyll-a, µg/l), 투명도(secchi depth; SD, m)이다. 기상자료는 해면기압(sea level pressure, hPa), 기온(air temperature, °C), 증기압(steam pressure, hPa), 상대습도(relative humidity, %), 증발량(evaporation, mm), 강수량(precipitation, mm), 풍속(wind speed, m/s), 구름운량(cloud, 1/10), 일조시간(sunshine time, hr), 일조율(sunshine percent, %) 등을 포함하였다.

2.2. 자료 분석

본 연구에서 수집한 수질자료는 물리적(수심)인 기

준에 의해서 각각 표, 저층으로 양분한 후 이들 양 그룹을 다시 화학적(염분)기준을 중심으로 염분대별로 3분하여 저염분대(<20 psu), 중염분대(20~30 psu), 고염분대(>30 psu)로 구분하였다. 따라서 전체 자료는 총 6개의 개별 자료 그룹으로 분류할 수 있다.⁸⁾ 6개 그룹의 수질자료에 대해 월 단위 대표치(월 평균)를 구하고, 세부적인 통계분석을 실시하였다. 기상자료 또한 수질자료와 마찬가지로 월 단위로 평균값을 취합하였다. 위의 6개 그룹에 대해서 수질자료간(염분대, 수심, 동일 자료군 내 개별변수간) 및 수질변수와 기상요소(강화, 서산, 아산, 인천에 대해서)와의 상관분석을 실시하였다. 그리고 연구해역 내의 수질변수의 분포를 결정짓는 주 요인을 분석하기 위해, Varimax 회전방법을 응용한 요인분석(factor analysis)을 실시하였다.

3. 결과 및 토론

3.1. 수질자료간의 상관성 분석

3.1.1. 염분대 및 수심의 차이가 수질변수에 미치는 영향

본 연구에서 동일한 수심에서 측정된 자료가 다시 염분대의 차이에 따라 어떠한 분포특성을 갖는가를 확인하기 위해, 개별 변수의 상관성을 염분의 차이(저-중, 중-고, 고-저염분대)로 분석하였다. Table 1에 의하면 수온, 용존산소, 총무기질소 등이 수심이나 염분대의 차이에 상관없이 고르게 유의한(P<0.01) 상관관계를 보여주었다(특히, 수온의 경우는 확률변수 P값이 일괄적으로 0.0001보다 작게 나타나 여타 변수에 비해 광역적으로 균질한 분포특성을 보여주는 것이 확인되었다). 또한 표층에서는 염분대의 차이에 상관없이 상관계수(correlation coefficient)가 약 0.82 이상, 저층에서는 표층보다 높은 상관계수(0.96)가 나타났다.

여타 변수의 경우에도 중-고염분대가 상대적으로 저-중 또는 고-저염분대간 상관분석의 결과보다 높은 상관성을 띠는 것으로 나타났다. 자세히 살펴보면, 표층에서는 12개 수질변수 가운데 중-고염분대에서 염분과 엽록소를 제외한 10개(전체 비교 쌍의 83%), 저-중염분대에서는 12개 수질변수 가운데 절반인 6개(전체 비교 쌍의 50%)의 수질변수(수온, 염분, 용존산소, 총무기질소, 아질산+질산성 질소, 규산염 규소), 고-저염분대에서는 12개 수질변수 중 4개(전체 비교 쌍의 33%)

Table 1. Results of correlation analysis between water bodies of different salinity ranges. All data were initially grouped by both water depth (surface and bottom) and salinity (high, mid & low salinity). Each individual parameter measured at each water depth were analyzed for the strength of correlation

Variables	Depth	Low vs. Mid salinity	Mid vs. Hi salinity	Hi vs. Low salinity
Temperature	surface	0.847(27) ^{*(III)}	0.979(63) ^(III)	0.818(24) ^(III)
	bottom	0.970(19) ^(III)	0.987(54) ^(III)	0.955(16) ^(III)
Salinity	surface	0.498(27) ^(I)	-0.258(64)	-0.048(24)
	bottom	0.489(19)	-0.189(54)	-0.438(16)
TSS	surface	-0.178(26)	0.629(63) ^(III)	-0.034(23)
	bottom	-0.416(11)	0.565(33) ^(II)	0.024(6)
DO	surface	0.632(23) ^(I)	0.784(59) ^(III)	0.541(22) ^(I)
	bottom	0.729(15) ^(I)	0.850(50) ^(III)	0.758(14) ^(I)
COD	surface	0.365(21)	0.641(54) ^(III)	-0.020(18)
	bottom	0.170(12)	0.322(42)	-0.272(11)
TIN	surface	0.603(20) ^(I)	0.536(53) ^(III)	0.702(18) ^(I)
	bottom	0.875(15) ^(I)	0.596(43) ^(III)	0.795(13) ^(III)
NO ₂ -N + NO ₃ -N	surface	0.681(22) ^(I)	0.859(49) ^(III)	0.689(18) ^(I)
	bottom	0.762(17) ^(I)	0.741(41) ^(III)	0.658(13)
NH ₄ -N	surface	0.330(21)	0.593(49) ^(III)	0.268(17)
	bottom	0.290(16)	0.545(41) ^(II)	0.322(13)
PO ₄ -P	surface	0.092(24)	0.599(55) ^(III)	0.039(19)
	bottom	0.930(17) ^(III)	0.777(45) ^(III)	0.438(13)
Si(OH) ₄ -Si	surface	0.681(13) ^(I)	0.743(19) ^(II)	0.848(6)
	bottom	0.558(8)	0.960(14) ^(III)	-1.000(2)
Chlorophyll-a	surface	0.396(9)	0.346(16)	0.095(6)
	bottom	0.967(3)	0.626(9)	-
SD**	surface	0.134(14)	0.583(23) ^(I)	-0.433(8)

*denotes correlation coefficient and numbers in the parenthesis are paired number of data sets.

**No differentiation was given between water depths.

(I), (II), (III) denote observed significance level (P-value) of <0.01, <0.001 and <0.0001, respectively.

의 수질변수에서 상관관계가 유의하게($P < 0.01$) 나타났다. 반면, 저층에서는 중-고염분대에서 염분, 화학적 산소요구량, 엽록소를 제외한 8개(전체 비교 쌍의 73%), 저-중염분대에서는 11개 수질변수 가운데 5개(전체 비교 쌍의 45%)의 수질변수(수온, 용존산소, 총 무기질소, 아질산+질산성 질소, 인산염 인), 고-저염분대에서는 11개 수질변수 가운데 3개(전체 비교 쌍의 27%)변수가 유의한($P < 0.01$) 것으로 나타났다. 따라서 중-고염분대간에 표층이나 저층을 막론하고 가장 빈번하게 강한 상관성이 발견되었다는 것을 알 수 있다. 반면에 고-저염분대간에 상관성이 가장 빈약하게 발견된다고 볼 수 있다.

경기만에서 수온의 공간변화는 수평적으로 육지에 인접한 저염분대에서 고염분대에 이르기까지 높은 상

관관계로 존재하였다. 또한 중-고염분대에 비해서 저-중, 고-저염분대의 수온의 상관관계가 다소 약하게 나타났다. 이는 육지에 인접한 저염분대의 경우, 인근 육지로부터의 담수 유입, 타염분대 보다 얕은 수심 등과 같은 요인으로 인해 기상요인(바람, 기온 등)에 민감한 데 따른 결과로 사료된다.

개별 변수를 이용하여 수층별로 분리된 자료로부터 염분대간의 분포특성을 비교해 보았다. 본문에서는 다시 2차적으로 동일한 염분대에서 관측된 개별 수질변수를 단순히 수심 차이를 기준으로(표층과 저층간에) 상관성의 여부를 분석하였다. 그 결과 전체적으로 수심의 차이에 관계없이 상관관계가 매우 높음을 확인할 수 있었다. 먼저 중, 고염분대는 모든 수질변수(수괴 투명도 제외)에서 매우 유의한($P < 0.0001$) 양의 상

관관계가 나타났다. 반면, 저염분대의 경우는 인산염 인, 규산염 규소, 엽록소를 제외한 나머지 8개 수질변수에서 수층의 차이에 상관없이 유의한 상관관계를 보였다. 총부유물질과 암모니아성 질소를 제외한 나머지 6개 수질변수는 확률변수 P값이 0.0001이하로 매우 유의한 상관관계를 보였다. 특히 저염분대의 표-저층간

상관분석 결과가 타염분대의 수심별 상관분석의 결과와 차이나는 것은 분석에 사용된 월 단위 평균값의 개수에서 약 3배 차이 등이 영향을 미친 것으로 사료된다.

3.1.2. 동일 자료군 내 개별 변수간의 상관성

본문에서는 개별 자료군내에 각각의 수질변수들간에 존재하는 상관성의 강도를 분석하였다. Table 2에는

Table 2. Results of correlation analysis between different water quality parameters. Comparison was made for three individual datagroups divided on the basis of salinity at surface water

Temp.	Sal.	TSS	DO	COD	TIN	NO23	NH ₄	PO ₄	Si	Chl-a	SD	
Temp.(27) low salinity range												
Sal.	0.095(27)	(27)										
TSS	0.065(26)	-0.005(26)	(26)									
DO	-0.611(23)*	0.280(23)	0.020(23)	(23)								
COD	-0.330(23)	-0.345(23)	0.238(23)	0.604(22)*	(23)							
TIN	-0.429(21)	0.267(21)	0.065(21)	0.739(21)*	0.638(30)*	(21)						
NO23	-0.102(23)	0.310(23)	0.047(23)	0.527(21)	0.186(21)	0.548(20)	(23)					
NH ₄	-0.448(22)	-0.434(22)	-0.143(22)	0.624(20)*	0.583(20)*	0.816(20)*	-0.143(22)	(22)				
PO ₄	-0.554(25)*	0.022(25)	-0.065(25)	0.678(23)*	0.771(23)*	0.692(21)*	0.408(23)	0.406(22)	(25)			
Si	-0.324(13)	0.103(13)	0.174(13)	0.702(11)	0.414(11)	0.339(10)	0.636(13)	-0.258(12)	0.442(13)	(13)		
Chl-a	-0.867(9)*	-0.171(9)	-0.086(9)	0.704(9)	0.915(8)*	0.803(9)*	-0.064(9)	0.878(9)*	0.944(9)*	0.455(5)	(9)	
SD	0.193(14)	-0.487(14)	-0.488(13)	-0.451(10)	-0.302(11)	-0.227(9)	-0.283(12)	-0.025(11)	-0.423(12)	-0.590(8)	-0.429(6)	(14)
Temp.(72) mid salinity range												
Sal.	-0.146(72)	(72)										
TSS	-0.370(70)*	-0.207(71)	(71)									
DO	-0.553(66)*	0.318(67)*	0.135(67)	(67)								
COD	-0.225(64)	-0.063(65)	0.236(65)	0.180(64)	(65)							
TIN	-0.168(63)	0.215(63)	0.063(63)	0.139(63)	0.313(62)	(63)						
NO23	-0.121(61)	0.076(61)	0.059(60)	0.285(58)	0.275(58)	0.782(57)*	(61)					
NH ₄	-0.287(59)	0.252(60)	0.026(60)	0.129(58)	0.307(58)	0.801(57)*	0.599(59)*	(60)				
PO ₄	-0.019(67)	0.132(68)	0.118(67)	0.284(65)	0.138(65)	0.485(63)*	0.502(61)*	0.375(60)*	(68)			
Si	-0.056(33)	-0.157(33)	0.087(32)	-0.368(30)	0.160(31)	0.192(30)	0.135(33)	0.010(32)	0.030(33)	(33)		
Chl-a	-0.203(23)	0.215(23)	0.079(21)	0.020(21)	0.586(20)*	0.064(20)	0.016(22)	0.173(20)	0.249(22)	-0.329(12)	(23)	
SD	0.471(41)*	0.233(41)	-0.480(40)*	-0.269(37)	-0.315(37)	-0.220(36)	-0.225(38)	-0.099(36)	-0.205(40)	-0.254(28)	0.041(20)	(41)
Temp.(79) high salinity range												
Sal.	-0.366(79)*	(79)										
TSS	-0.482(76)*	0.371(76)*	(76)									
DO	-0.507(72)*	0.214(72)	0.190(71)	(72)								
COD	-0.162(66)	-0.132(66)	-0.036(66)	0.439(66)*	(66)							
TIN	-0.144(64)	0.115(64)	-0.086(64)	0.425(64)*	0.385(63)*	(64)						
NO23	-0.205(57)	0.097(57)	0.024(56)	0.526(56)*	0.537(55)*	0.730(56)*	(57)					
NH ₄	0.069(58)	-0.219(58)	-0.166(58)	0.088(58)	0.370(57)*	0.445(56)*	0.518(56)*	(58)				
PO ₄	-0.005(67)	-0.017(67)	-0.255(66)	0.284(66)	0.410(65)*	0.369(64)*	0.417(57)*	0.337(58)*	(67)			
Si	-0.478(31)*	0.332(31)	0.331(30)	0.325(30)	0.328(30)	-0.057(30)	0.142(31)	-0.191(30)	0.413(31)	(31)		
Chl-a	0.308(25)	-0.071(25)	-0.300(23)	-0.148(23)	-0.010(22)	-0.202(23)	-0.069(24)	-0.181(23)	0.521(24)*	-0.206(15)	(25)	
SD	0.610(39)*	-0.223(39)	-0.530(38)*	-0.244(38)	-0.109(38)	-0.093(38)	0.030(36)	0.071(35)	0.002(39)	-0.502(26)*	0.379(22)	(39)

*denotes observed significance level (P-value) of <0.01.

표층에 대한 분석결과를 제시하였다. 각 자료군에서 확률변수가 0.01이하로 유의한 상관관계를 보인 수질자료 쌍의 개수는 다음과 같다; (1) 저염분대-표층: 전체 66개의 자료 쌍 중 16개 (2) 중염분대-표층: 전체 66개의 자료 쌍 중 12개 (3) 고염분대-표층: 전체 66개의 자료 쌍 중 22개로 나타났다. 저층에 대해서도 이와 유사한 분석을 실시한 결과, 저염분대에서 전체 55개의 자료쌍 중에서 5개, 중염분대에서는 전체 55개의 자료쌍 중에서 6개, 그리고 고염분대에서 전체 55개 자료쌍 중에서 20개가 나타났다. 따라서 고염분대의 표층과 저층 자료군에서 가장 빈번하게 유의한 상관관계를 확인할 수 있었다. 비교분석이 이루어진 여러 수질 변수들의 쌍 중에서도 이와 같은 결과는, 수심의 차이에 상관없이 비교적 균질한 수질특성을 유지하는 고염분대의 해수화학적 특성이 잘 반영된데 따른 결과로 보인다. 개별변수별로는 수온-용존산소가 음의 상관관계를 보인데 반해, 총무기질소-인산염 인, 총무기질소-아질산(+질산염) 질소, 총무기질소-암모니아성 질소는 양의 상관관계를 보였다. 그런데 이러한 상관관계는 6

개의 자료군중 5개 자료군에서 모두 유의한 수준인 것으로 나타났다.

3.2. 지역별 기상현황

강화, 서산, 아산, 인천에서 1985년 11월부터 1998년 3월까지 관측된 10가지 기상요소의 기본적인 통계 값을 Table 3에 제시하였다. 기상자료의 경우 수질자료에 비해 전체 연구기간동안 월 단위 자료가 균일하게 분포한다. 특히 인천이나 서산지역은 모든 기상자료에 대해서 전체 연구기간과 일치하는 월별 자료(총 149개월)가 존재하였다. 위 4지역의 기상자료 중에 증발량과 풍속을 제외한 나머지 8가지 기상요소는 기역 별로 큰 차이가 나타나지 않음을 알 수 있다. 그러나 전체 연구기간동안 인천지역의 평균 증발량이 약 97.2 mm인데 반해서 서산지역은 약 34.0 mm으로 약 3배 정도의 차이가 나타났다. 풍속의 경우에도 인천지역이 전체연구기간동안 약 3.03 m/s로 높은 값을 보인데 반해서 아산지역은 약 1.46 m/s로 인천지역의 절반에 해당하는 값을 나타냈다.

Table 3. A statistical summary of major meteorological parameters categorized by individual measurement sites in the Gyunggi Bay region of Korea (1985.11-1998.3)

	Inch'on	Sosan	Kanghwa	Asan
	mean \pm SE (min~max)			
M.S.L. pressure (hPa)	1016 \pm 0.6 (1005~1027)	1017 \pm 0.6 (1005~1027)	1018 \pm 0.8 ^A (1006~1028)	1017 \pm 0.8 ^A (1006~1028)
Air temperature (°C)	11.5 \pm 0.76 (-5.00~27.2)	11.5 \pm 0.76 (-4.30~27.5)	10.7 \pm 0.78 (-6.70~26.4)	11.4 \pm 0.80 (-5.70~28.4)
Steam pressure (hPa)	11.7 \pm 0.62 (2.80~29.1)	11.9 \pm 0.62 (3.30~28.7)	11.7 \pm 0.89 ^A (3.00~30.9)	10.6 \pm 0.80 ^A (2.60~28.4)
Relative humidity (%)	69 \pm 0.7 (50~88)	74 \pm 0.5 (61~88)	72 \pm 0.7 (54~90)	73 \pm 0.9 (43~92)
Precipitation (mm)	98.2 \pm 10.1 (0.70~630)	97.1 \pm 9.84 (0.00~993)	110 \pm 12.5 (0.00~711)	100 \pm 11.0 (0.50~1083)
Evaporation (mm)	97.2 \pm 3.4 (34.1~179)	34.0 \pm 3.9 (0.00~148)	77.5 \pm 4.9 ^B (19.5~140)	84.4 \pm 3.6 ^C (23.8~178)
Wind speed (m/s)	3.03 \pm 0.05 (1.50~4.40)	2.20 \pm 0.04 (1.20~3.80)	1.63 \pm 0.03 (0.7~2.90)	1.46 \pm 0.03 (0.60~2.40)
Cloud amount (1/10)	47 \pm 1.1 (23~83)	50 \pm 1.0 (23~83)	44 \pm 1.6 ^A (21~79)	49 \pm 1.4 ^A (23~79)
Sunshine total time (hr)	201 \pm 3.14 (107~291)	186 \pm 3.63 (94.5~274)	198 \pm 3.66 (88.4~298)	204 \pm 3.60 (92.3~289)
Sunshine percentage (%)	55 \pm 0.8 (25~74)	50 \pm 0.9 (5.3~69)	54 \pm 0.9 (20~78)	55 \pm 0.8 (23~77)

A, B and C denote number of data (A=75, B=62, C=137 and the others=149).

기상요소가 관측된 4개 지역에 대해서 공간적인 이질성을 비교하기 위해 t-분포를 이용한 가설검정을 95% 신뢰구간에서 실시하였다. 그 결과 평균해면기압, 기온, 증기압, 강수량은 통계적으로 4개 지역에 대해 별다른 차이가 없다는 결과가 확인되었다. 반면에 상대습도와 증발량은 인천지역만이 다른 3개 지역(서산, 강화, 아산)과 차이가 있다는 결과가 확인되었다. 풍속은 지역간에 모두 서로 다르다는 결과가 나타났다. 구름운량은 인천-강화, 인천-아산, 서산-아산만이 다르지 않고 나머지 지역간에는 차이가 있다는 결과가 나타났다. 총 일조시간과 일조율은 두 요소 모두 인천-강화, 인천-아산, 강화-아산만에 차이가 없지만 여타 비교대상 간에는 차이가 있다는 결과가 나타났다.

위에서 t-test를 실시한 것은 각 변수의 차이가 통계적으로 유의한가에 대한 여부를 확인한 것이다. 이와 별도로 각 변수들간의 상관성을 확인하기 위해, 모든 기상요소에 대해 지역별로 상관분석을 행하였다(Fig. 2). 그 결과에 따르면, 모두 유의한($P < 0.001$) 양의 상관관계를 보였는데, 특히 평균해면기압, 기온, 증기압, 증발량의 경우에는 4지역간의 상관계수가 모두 0.9 이상으로 매우 높은 양의 상관관계가 확인되었다. 반면에 풍속은 타 기상요소에 비해서 낮은 상관계수 값을 나타내어 t-test의 결과와도 일치하였다. 그리고 4개의 연구대상지역 중 각 지역별로 기상요소간 상관분석결과에 의하면, 총 45개의 비교대상 중 강화 27(약 60%), 서산 29(약 64%), 아산 29(약 64%), 인천 39(약 87%)개가 유의한($P < 0.01$) 상관관계를 보였다. 이 중에서도 강화 12, 서산 13, 아산 13, 인천에서 19개

의 기상요소가 음의 상관관계를 갖는 것으로 나타났다.

3.3. 수질변수와 기상인자와의 상관성 분석

3.3.1. 수심 및 염분대로 구분한 6개 그룹

기상인자가 수질변수의 분포특성에 미치는 영향을 파악하기 위해, 수질자료는 6개 자료군(저염분-표층, 저염분-저층, 중염분-표층, 중염분-저층, 고염분-표층, 고염분-저층) 각각에 대한 12가지 수질변수, 기상자료는 강화, 서산, 아산, 인천 지역에서 각각 관측된 10가지 기상요소를 사용하여 상관성 분석을 실시하였다.

먼저 6개 자료군별로 수질-기상자료간 상관분석의 결과를 살펴보면 다음과 같다. 이러한 결과가 지니는 의미를 심층적으로 해석하기 위해 개별 비교 쌍 간에 상관성의 강도를 확률값(P)을 기준으로 비교하였다. 임의의 P값 0.1을 기준으로 유의성의 유무를 구분하였을 때, 다음과 같은 결과가 확인되었다. (1) 저염분-표층: 120개 수질-기상자료 쌍 가운데 17개가 모든 기상지점에서 공통적으로 유의한 상관관계로 나타났다. 이 가운데 8개(수온-기온, 염록소-해면기압, 수온-증기압, 수온-증발량 등)가 양의 상관관계, 9개(수온-해면기압, 염록소-기온, 염록소-증기압, 염록소-상대습도 등)가 음의 상관관계인 것으로 나타났다. (2) 저염분-저층: 기상관측지점 4곳에서 짝을 이루는 110가지의 수질-기상자료 쌍 가운데 6개가 유의한 상관관계로 나타났는데, 1개(수온-해면기압)만이 음의 상관관계를 보였고, 나머지 5개(수온-기온, 수온-증기압, 수온-강수량, 수온-증발량, 수온-구름운량)는 양의 상관관계로 나타났다. (3) 중염분-표층: 120개의 수질-기상자료 쌍 가운데 기상관측지점 4곳에서 공통적으로 22개가 유의한 상관관계로 나타났고, 이 가운데 절반인 11개(수온-기온, 수온-증기압, 수온-증발량 등)가 양의 상관관계, 나머지 11개(수온-해면기압, 용존산소-기온, 투명도-해면기압 등)에서 음의 상관관계인 것으로 나타났다. (4) 중염분-저: 기상관측지점 4곳에서 공통적으로 110개의 수질-기상자료 쌍 가운데 12개가 유의한 상관관계였고, 이 가운데 8개(수온-기온, 수온-증기압, 규산염규소-강수량, 수온-증발량 등)가 양의 상관관계, 4개(수온-해면기압 등)가 음의 상관관계인 것으로 나타났다. (5) 고염분-표층: 기상관측지점 4곳에서 공통적으로 120개의 수질-기상자료 쌍 가운데 26개에서 유의한 상관관계가 나타났으며, 이 가운데 12개(규산염규소-해면기압, 수온-기온,

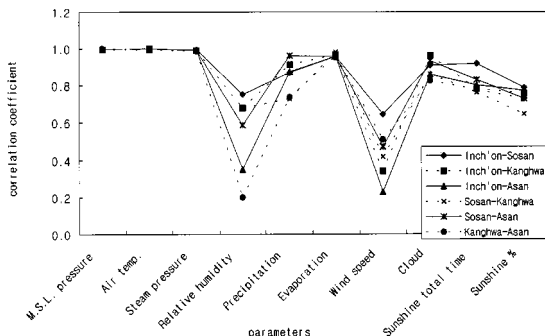


Fig. 2. Comparison of correlation coefficients for each meteorological variables between different study sites (all correlations are significant at 0.001 level).

투명도-증기압, 수온-증발량 등)가 양의 상관관계, 14개(수온-해면기압, 투명도-해면기압, 규산염규소-기온, 규산염규소-증발량 등)가 음의 상관관계인 것으로 나타났다. (6) 고염분-저층: 마찬가지로 기상관측지점 4곳에서 공통적으로 110개의 수질-기상자료 쌍 가운데 22개에서 유의한 상관관계가 나타났으며, 이 가운데 9개(수온-기온, 수온-증기압, 수온-증발량 등)가 양의 상관관계, 13개(수온-해면기압, 염분도-증기압, 규산염규소-총일조시간 등)가 음의 상관관계인 것으로 나타났다. 결과적으로 기상-수질변수간에 강한 상관성을 띠는 경우를 출현빈도를 기준으로 서열 화하면, 고염분대-표층>고염분대-저층>중염분대-표층>저염분대-표층>중염분대-저층>저염분대-저층 순으로 나타났다. 따라서 이와 같은 결과는 보다 광역적인 분포를 취하는 고염분대의 영역에서 수질변수에 미치는 기상요인의 영향력이 크다는 점을 확인시켜준다. 특히 수온은 대부분의 자료군에서 공통적으로 기상요소와 모두 유의한 상관관계를 갖는 것으로 나타났다. 용존산소의 경우에도 저염분대-저층을 제외한 나머지 5개 자료군과 기상관측지점 4곳에서 공통적으로 해면기압, 기온, 증기압과 유의한 상관관계를 갖는 사실이 확인되었다. 따라서 수온과 용존산소가 본 연구에서 분석하는 수질변수 가운데 기상요소에 가장 민감하게 영향을 받는 것으로 나타났다. 한편, Ahn *et al.*,¹⁰⁾ 한과 정¹¹⁾은 해면수온이 연안기후에 미치는 영향을 조사하고, 해면수온과 연안의 기온, 습도 사이에는 밀접한 상관관계가 있다고 보고한 바 있다. 김 등¹²⁾은 동·서해안 지방의 연안수온변동이 증기압 및 기온과 밀접한 관련이 있다는 연구결과를 발표한 바 있어 본 연구결과와 유사하다.

3.3.2. 기상관측지점별 상관분석

염분대 및 수심에 따른 자료별 분류에 덧붙여, 4곳의 기상관측지점들 각각에 대해 수질-기상자료간 상관분석을 실시한 결과는 다음과 같다. 앞에서와 마찬가지로 이들 결과의 유의성은 임의의 P값 0.1에 준하여 비교하였다. (1) 강화에서 관측된 모든 기상요소와 수질자료와의 상관분석결과 6개 자료군에서 공통적으로 (총 120가지 상관관계 가운데) 11개의 유의한 상관관계가 확인되었다. 이 가운데 수온-해면기압, 투명도-그룹운량, 수온-일조율 3개는 음의 상관관계, 투명도-해면기압, 수온-기온, 수온-증기압, 용존산소-풍속 등 8개가 양의 상관관계를 나타냈다. (2) 서산에서는 6개 자

료군에서 공통적으로 확인되는 총 120가지 상관관계 중 7개만이 유의한 상관관계였고, 이 가운데 수온-해면기압만이 음의 상관관계로 나타났다. 나머지 수온-기온, 수온-증기압, 수온-상대습도 등 6개는 양의 상관관계로 나타났다. (3) 아산지점에서는 총 120개 가운데 9개가 유의한 상관관계였으며, 수온-해면기압, 투명도-증기압, 용존산소-상대습도 3개가 음의 상관관계를 보였다. 반면, 투명도-해면기압, 수온-기온, 수온-증기압 등 6개가 양의 상관관계를 갖는 것으로 나타났다. (4) 마지막으로 인천지점에서 실시한 수질-기상간 상관분석결과는 6개 자료군에서 공통적으로 총 120개 상관관계 가운데 10개가 유의한 상관관계로 나타났다. 이 중에서도 수온-해면기압, 투명도-상대습도, 수온-풍속, 수온-일조율 4개는 음의 상관관계, 수온-기온, 수온-증기압, 수온-상대습도 등 6개는 양의 상관관계로 나타났다. 인천지방의 경우에는 김 등¹²⁾의 연구에서도 본 연구결과와 일치하는 양의 상관관계를 보인 바 있다. 결과적으로 연구결과에 의하면 기상관측지점에 상관없이 수온-기온의 상관분석결과는 항상 양의 상관관계로 나타남을 볼 수 있었는데, 이는 우리나라 대기와 해양간의 열교환 특성에 대한 봉¹³⁾의 연구에서 연안수온변동이 열교환량 변동과 밀접한 관계가 있다는 결과와 일치하였다.

3.3.3. 수심, 염분대, 기상관측지점으로 구분한 총 24개 그룹

수심 및 염분대에 따른 6개 자료군을 다시 4개의 관측지점별로 구분한 총 24개의 자료군에 대한 상관분석 결과에 따르면 각각의 기상관측지점을 기준으로 유의한 상관관계를 갖는 자료 쌍의 빈도수가 인천(6개 자료군의 총 합이 203개)>아산(6개 자료군의 총합이 200개)>강화(6개 자료군의 총합이 191개)>서산(6개 자료군의 총합이 179개)의 순으로 나타났다. 즉 인천지점에서 본 연구해역의 수질자료와 유의한 상관관계를 갖는 자료 쌍이 가장 많음을 확인할 수 있었다. 개별적으로는 총 24개의 그룹 가운데 고염분대-표층의 인천지점이 총 120개 자료 쌍 가운데 가장 많은 52개 (약 43%)의 경우에서 유의한 상관관계를 갖는 것으로 나타났다. 이는 수질자료만의 상관분석결과에서도 볼 수 있듯이 고염분대-표층에 수질자료 수가 가장 많이 분포한데 따른 점도 무시할 수 없지만, 인천지점의 기상현상이 실제로 본 연구해역에서 관측된 표층 수질자

료의 분포에 가장 많은 영향을 주는 것으로 사료된다. 그러나 상대적으로 24개의 그룹 가운데 저염분대-저층의 인천지점은 총 110개의 비교쌍 가운데 가장 적은 17개(약 15%)가 유의한 상관관계인 것으로 나타나서, 저염분대-저층이 상대적으로 기상현상의 직접적인 영향을 받기가 어렵다는 사실을 뚜렷하게 확인해주었다.

3.4. 수질변수의 지화학적 거동을 조절하는 요인에 대한 분석

연구해역의 수질분포 특성이 주로 어떤 요인들에 의해 조절되었는가의 여부를 알아보기 위해, SPSS를 이용하여 월 단위로 산출된 개별 수질 및 기상변수의 평균치들에 대해 요인분석(factor analysis)을 수행하였다.

단, 요인분석과 관련된 자료해석을 돕기 위해, 기상자료는 수질자료와의 비교에서 가장 높은 연계성을 보여준 인천지점의 측정자료로 국한하였다(이는 인천지점에서 관측된 기상자료에서 유의한 상관관계를 갖는 수질-기상 자료 쌍이 가장 많이 나타났다는 점을 감안한데 따른 것이다). 단, 저염분대의 수질변수는 자료 개수의 제한으로 인해, 요인분석을 실행할 수 없었다. 중·고염분대의 수질자료와 인천지점의 기상자료간의 분석결과, 해수의 물리적, 화학적, 생물적인 요인 등에 뚜렷하게 영향을 받는 것으로 나타났다(Table 4).

4개 자료군의 요인분석 결과를 정리하면 모든 자료군에서 예외 없이 기온, 증기압과 같은 기상적 요인이 가장 중요하게 나타났다. 두 번째로 총무기질소, 암모

Table 4. Varimax rotated factor loading matrix for water parameters and meteorological variables of Kyunggi Bay (mid salinity)

Variables	Mid salinity-surface factors				Com.	Mid salinity-bottom factors					Com.
	1	2	3	4		1	2	3	4	5	
Water temp.	0.93	0.32			97	0.66	-0.26	-0.66	0.10	0.22	99
Salinity		-0.83	0.41		85	-0.49	0.75				80
TSS	-0.85	-0.26			80	-0.69		0.54	0.16	-0.14	82
DO	-0.93	-0.20		0.15	93	-0.55		0.77			91
COD	-0.23	-0.26	0.72	0.18	67	-0.58	0.39	0.15	0.41	0.23	73
TIN		0.21	0.95		95		0.87	0.29	0.38		99
NO ₂₃ -N		0.19	0.93	-0.13	91		0.32	0.18	0.82	-0.30	91
NH ₄ -N	-0.38	-0.25	0.79	0.28	91		0.93	0.26			96
PO ₄ -P			0.91	0.12	85	0.18	0.93		0.23	0.13	97
Si(OH) ₄ -Si	0.42	0.20	0.71	-0.29	80	0.31	0.11		0.91	-0.16	97
Chlorophyll-a	-0.25			0.80	71	-0.14	0.19	0.68		0.54	81
SD	0.45	0.50	-0.51	0.23	77	-	-	-	-	-	-
S.L. pressure	-0.51	-0.77	-0.12	-0.23	92	-0.97					94
Air temp.	0.83	0.55		0.12	100	0.86	-0.11	-0.44		0.20	99
Steam pressure	0.77	0.59	0.18		96	0.86	-0.13	-0.36	0.23		95
Relative humidity	0.66	0.69	0.17	-0.21	97	0.91		-0.31	0.19	-0.11	99
Precipitation	0.48	0.74	0.42		96	0.83	-0.21		0.50		98
Evaporation	0.64	0.54	0.24	0.43	95	0.87	0.16	-0.13		0.42	98
Wind speed	-0.85	0.23	0.35		90		0.43	0.86	0.13		94
Cloud	0.33	0.83	0.12	-0.37	95	0.90			0.21	-0.29	94
Sunshine time	0.31		0.10	0.89	91	0.20	0.18		-0.34	0.86	93
Sunshine %		-0.69		0.69	95	-0.78			-0.17	0.59	98
Eigenvalue	6.6	5.2	5.1	2.7		8.1	3.8	3.2	2.5	2.0	
% variance	30.1	23.4	23.3	12.2		38.6	17.9	15.1	11.8	9.4	
Cumm.	30.1	53.6	76.9	89.0		38.6	56.5	71.6	83.4	92.8	

Com.: Communality (percent of maximum variance)

Cumm.: Cummulative percent of variance

Factor values below 0.1 are not provided in the table.

니아성 질소, 인산염 인 등의 화학적 요인이 중요하게 나타났다. 세 번째는 일차생산력을 대표하는 엽록소(모든 자료군에서 고유치가 1이상인 요인에 포함됨)가 일조시간(중염분대-표층, 중염분대-저층, 고염분대-저층), 일조율(중염분대-표층, 중염분대-저층), 구름(고염분대-표층) 등과 함께 중요한 요인 가운데 하나로 나타났다. 이는 Kirk¹⁴⁾와 Platt and Sathyendranath¹⁵⁾의 일차생산력을 결정하는 일차적 요인은 생체량과 광량이라는 연구와, Riegman and Colijn¹⁶⁾이 북해의 Dogger Bank의 일차생산력 조사에서 구름에 의한 일차생산력의 변동 규모가 4.5배에 이르는 것으로 추산한 연구결과와도 일관성이 있는 것으로 사료된다. 황해 중·동부 연안 수역의 높은 일차 생산력은 좋은 광조건과 풍부한 영양염 공급에 기인된 것이라는 최¹⁷⁾의 연구와도 유의성이 있는 것으로 보인다. 따라서 해수질의 분포 특성 등을 보다 체계적으로 설명하기 위해서는, 단순히 수질자료만으로 분석하는 것보다는 여러 기상요소와의 관계로부터 재조명하는 것이 필요하다고 사료된다.

4. 결 론

한반도 서해중부에 위치한 경기만 해역에서 1985년부터 1998년까지 시행된 61개의 연구사업 및 보고서의 결과로부터 얻은 주요 수질자료와 동일기간의 기상청 기상월보⁹⁾의 기상자료를 이용하여, 수질변수의 지화학적 거동을 조절하는 요인들에 대한 분석을 실시하였다.

(1) 수심별로 염분대간 상관성 분석의 결과, 중-고염분대(표층)>중-고염분대(저층)>저-중염분대(표층)>저-중염분대(저층)>고-저염분대(표층)>고-저염분대(저층)의 순으로 강한 상관성이 발견되었다. 동일한 염분대에서 수질변수의 수심간 상관성 분석결과, 전체적으로 수심(표층과 저층)의 차이에 상관없이 대부분의 수질변수들이 높은 상관성을 보여주었다. 6개의 자료군별로 각각의 개별 수질변수들간의 상관성을 분석한 결과에 따르면 수심의 차이에 상관없이 비교적 균질한 수질특성을 유지하는 고염분대의 표층과 저층이 가장 빈번하게 유의한 상관관계를 보였다. 개별 변수별로는 수온-용존산소는 음의 상관관계를 보였지만, 총무기질소-인산염 인, 총무기질소-질산(+아질산)염 질소, 총무기질소-암모니아성 질소는 양의 상관관계를 유지하였다.

(2) 연구해역의 기상자료에 대한 t-test 및 상관분석 결과에서는 대체로 강화, 서산, 아산, 인천지점별로 유사한 분포를 보였으며, 다만 증발량과 풍속의 경우는 두 분석에서 모두 지역 및 다른 기상요소별로 다르다는 결과가 나타났다.

(3) 수질변수와 기상요소와의 상관성 분석결과, 먼저 6개 자료군별로는 고염분대-표층>고염분대-저층>중염분대-표층>저염분대-표층>중염분대-저층>저염분대-저층의 순으로 유의한 상관관계 출현 빈도가 많이 나타났다. 특히 수온과 용존산소의 경우 본 연구에서 분석하는 수질변수 가운데 기상요소에 가장 민감하게 영향을 받는 것으로 나타났다. 염분, 수심, 기상관측지점을 동시에 적용한 총 24개의 자료군에 대한 상관성 분석 결과에서는 고염분대-표층(인천)이 총 120개 자료 쌍 가운데 가장 많은 52회(약 43%)에서 유의한 상관관계를 갖는 것으로 나타났다. 덧붙여서 기상관측지점을 기준으로 정리하면 인천>아산>강화>서산의 순으로 유의한 상관관계를 갖는 자료 쌍이 많이 나타났다.

(4) 수질변수의 지화학적 거동을 조절하는 요인에는 어떠한 것들이 있는지 밝히기 위한 요인분석결과, 기온, 증기압과 같은 기상요인이 예외 없이 가장 중요하게 나타났고, 다음으로 총무기질소, 암모니아성 질소, 인산염 인 등의 화학적 요인이 중요하게 나타났다. 마지막으로 일차생산력을 좌우하는 엽록소, 일조시간, 일조율 등과 같은 생물적 요인이 중요한 요인 가운데 하나로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 교육부 거점연구소(BSRI-98-5424)의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

- 1) Ahn, T. S., B. C. Kim and K. S. Cho, *Kor. J. Lim.*, **1986**, 19(3-4), 11-17.
- 2) 위인선, 전순배, 이종빈, 나명석, 환경생물학회지, **1993**, 11(1), 11-16.
- 3) Hong, S. W., Y. C. Hah and T. S. Ahn, *J. Kor. Wat. Pollut. Res. Contr.*, **1985**, 1(1), 9-17.
- 4) Carter, V., N. B. Rybicki, J. M. Landwehr and M. Turtora, *Estuaries*, **1994**, 17(2), 417-426.

- 5) Choi, J. K. and J. H. Shim, *J. Oceanol. Soc. Korea*, **1986**, 21(2), 101-109.
- 6) 유신재, 신경순, *해양연구*, **1995**, 17(2), 91-99.
- 7) 조홍연, 채장원, *해양연구*, **1999**, 21(1), 13-25.
- 8) 김나영, 김기현, 박 경, *한국지구과학회지*, **1999**, 20(5), 564-579.
- 9) 기상청, 1985-1998, *기상월보*, 기상청.
- 10) Ahn, Y. S., Y. S. Kim and Y. H. Han, *Bull. Korean Fish. Soc.*, **1984**, 17(6), 566-574.
- 11) 한영호, 정정실, *한국기상학회지*, **1991**, 27(3), 197-203.
- 12) 김영섭, 한영호, 신수경, 홍성근, *한국수산학회지*, **1994**, 27(3), 314-325.
- 13) 봉중현, *한국해양학회지*, **1976**, 11(2), 43-50.
- 14) Kirk, J. T. O., 1994. *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*. Cambridge Univ. Press.
- 15) Platt, T. and S. Sathyendarnath, 1995, "Fundamental issues in measurement of primary production", Vol. 197, pp. 3-8, In: W.K.W. Li and S. Maestrini (eds.), *Measurement of Primary Production from the Molecular to the Global Scale*. ICES Marine Science Symposia, Copenhagen.
- 16) Riegman, R. and F. Colijn, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **1991**, 69(1/2), 125-132.
- 17) 최중기, *한국해양학회지*, **1991**, 26(3), 223-241.